

<https://doi.org/10.15517/q8khh806>

Diversidad y estructura florística en sistemas agroforestales de cacao, *Theobroma cacao* (Malvaceae) en cinco ecorregiones de Colombia

Darwin J. Ebratt-Matute^{1,2*};  <https://orcid.org/0000-0003-1289-0461>
Carlos Alberto Vargas Rincón³;  <https://orcid.org/0000-0001-6619-3309>
Laura Victoria Campos Salazar⁴;  <https://orcid.org/0000-0002-3741-3496>
Juan Fernando Gutiérrez-Cárdenas¹;  <https://orcid.org/0000-0002-1626-9595>
Gladys Asbleidy Arcila-Monroy¹;  <https://orcid.org/0009-0003-7191-5750>
Deyse Milena Cerón Amador¹;  <https://orcid.org/0009-0004-1749-7655>
Edinson Vargas Ardila¹;  <https://orcid.org/0009-0007-1608-4682>
Alejandra Díaz-Arango¹;  <https://orcid.org/0000-0002-3321-1352>
Eliana Jimena García-Marin¹;  <https://orcid.org/0009-0007-1342-6130>
Andrés Felipe Vélez Betancourt¹;  <https://orcid.org/0000-0002-5350-1891>
Sayda Milena Estupiñán Duarte¹;  <https://orcid.org/0009-0009-1242-4891>
Ramón José Ayala Alemán¹;  <https://orcid.org/0009-0008-5508-5781>
Joel Brounen⁵;  <https://orcid.org/0009-0007-3041-7244>

1. Solidaridad Network, Programa Cacao y Carbono, Cl. 79a #8-63, Bogotá, Colombia; darwin.ebratt@solidaridadnetwork.org (Correspondencia)*; juanfernando.gutierrez@solidaridadnetwork.org; gladys.arcila@solidaridadnetwork.org; deyse.ceron@solidaridadnetwork.org; edinson.vargas@solidaridadnetwork.org; alejandra.diaz@solidaridadnetwork.org; eliana.garcia@solidaridadnetwork.org; andres.velez@solidaridadnetwork.org; sayda.duarte@solidaridadnetwork.org; jose.ayala@solidaridadnetwork.org
2. Escuela de Ciencias Básicas y Aplicadas, Maestría en Ciencias-Biología, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia; debratt19@unisalle.edu.co
3. Jardín Botánico de Bogotá, Subdirección Científica, Bogotá, Colombia; cvargas@jbb.gov.co
4. Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Cra 30 45-02, Ciudad Universitaria, Bogotá, 111321, Colombia; lvcampos@unal.edu.co
5. Solidaridad Network, Gerencia País, Cl. 79a #8-63, Bogotá, Colombia; joel.brounen@solidaridadnetwork.org

Recibido 21-VII-2025. Corregido 08-I-2026. Aceptado 07-IV-2026.

ABSTRACT

Floristic diversity and structure in cacao agroforestry systems, *Theobroma cacao* (Malvaceae) from five ecoregions of Colombia

Introduction: The expansion of the agricultural frontier and biodiversity loss in Colombia have driven the search for more sustainable production systems. Cocoa Agroforestry Systems (AFS) represent an alternative that integrates conservation and production; however, information on their floristic diversity and structure at the national scale remains limited.

Objective: To analyze the floristic diversity and structure associated with cocoa AFS across five ecoregions of Colombia as a basis for management approaches with an agroecological perspective.

Methods: Within the framework of the *Asómbate* program, 500 one-hectare plots distributed across five ecoregions (100 plots per ecoregion) were analyzed. All individuals with Diameter at Breast Height (DBH) ≥ 10 cm



were recorded, and richness, density, structure, the Importance Value Index for species (IVI) and the Family Importance Value (FIV). Alpha diversity (Hill numbers) and beta diversity (Bray–Curtis index) were calculated, and sampling sufficiency (> 90 %) was evaluated using rarefaction and extrapolation curves.

Results: A total of 38 221 individuals belonging to 205 species, 153 genera, and 51 families were recorded. Shrub and sub-canopy strata predominated (83 %), as did individuals with DBH < 40 cm (82.6 %). *Persea americana*, *Musa paradisiaca*, *Cordia alliodora*, and the family Fabaceae showed the highest importance values. Alpha diversity was intermediate, and floristic similarity among ecoregions was variable. Sampling completeness exceeded 90 %.

Conclusion: Cacao agroforestry systems exhibit relevant floristic and structural diversity, with variations among ecoregions expressed mainly in species richness, highlighting their importance as sustainable production systems and the need for differentiated management approaches in Colombia's cacao-growing landscapes.

Key words: abundance; composition; agroecological management; richness; ecosystem services.

RESUMEN

Introducción: La expansión de la frontera agrícola y la pérdida de biodiversidad en Colombia han impulsado la búsqueda de sistemas productivos más sostenibles. Los Sistemas Agroforestales de Cacao (SAF) son una alternativa que combina conservación y producción; sin embargo, la información sobre su diversidad y estructura florística a escala nacional sigue siendo limitada.

Objetivo: Analizar la diversidad y estructura florística asociada a SAF de cacao en cinco ecorregiones de Colombia, como base para enfoques de manejo con perspectiva agroecológica.

Métodos: En el marco del programa Asómbrate, se analizaron 500 parcelas de una hectárea distribuidas en cinco ecorregiones (100 parcelas por ecorregión). Se registraron individuos con Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) ≥ 10 cm, evaluando riqueza, densidad, estructura, Índice de Valor de Importancia para especies (IVI) e índice de valor de importancia para familias (IVF). Se calculó la diversidad alfa (números de Hill) y beta (Bray-Curtis), validando la suficiencia del muestreo (> 90 %) con curvas de rarefacción y extrapolación.

Resultados: Se hallaron 38 221 individuos de 205 especies, 153 géneros y 51 familias. Predominaron los estratos arbustivo y subarbóreo (83 %) y diámetros < 40 cm (82.6 %). Destacaron *Persea americana*, *Musa paradisiaca*, *Cordia alliodora* y Fabaceae. La diversidad alfa fue intermedia y la similitud entre regiones fue variable. El muestreo mostró una completitud superior al 90 %.

Conclusión: Los sistemas agroforestales de cacao presentan una diversidad florística y estructural relevante, con variaciones entre ecorregiones expresadas principalmente en la riqueza de especies, lo que resalta su importancia como sistemas productivos sostenibles y la necesidad de enfoques de manejo diferenciados en los paisajes cacaoteros de Colombia.

Palabras clave: abundancia; composición; manejo agroecológico; riqueza; servicios ecosistémicos.

INTRODUCCIÓN

Las actividades agropecuarias ejercen presión significativa sobre la biodiversidad vegetal a nivel global, intensificadas por el cambio climático, la sobreexplotación de los recursos naturales y la expansión agrícola (Chan et al., 2019; Tittensor et al., 2014). Esta condición ha afectado principalmente a países altamente biodiversos y socioeconómicamente vulnerables (Lopez-Gallego & Morales-Morales, 2022; Roncancio et al., 2020). Colombia es un país megadiverso y con altos índices de endemismo, donde la expansión de la frontera agrícola ha incrementado las tasas de deforestación en un

43 % entre el 2023 y el 2024, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2025), lo que evidencia la necesidad de estrategias productivas más sostenibles que integren la conservación, la seguridad alimentaria y la producción de alimentos (Guerro-Pineda et al., 2022; Sinclair et al., 2022).

En este contexto, el cacao en Colombia se destaca como un cultivo de importancia económica y social, con 65 000 familias productoras y cerca de 200 000 hectáreas sembradas (Fedecacao, 2025). Frente a los desafíos que implica la expansión de la frontera agrícola y el cambio climático, los sistemas agroforestales surgen como alternativa viable frente a los sistemas

agrícolas convencionales. Estos permiten conservar niveles intermedios de biodiversidad, aportar resiliencia ecológica y garantizar servicios ecosistémicos esenciales (Bhagwat et al., 2008; Somarriba & Beer, 2011; Tscharntke et al., 2011; Ordoñez-Espinosa et al., 2020).

La agroforestería cumple con tres condiciones fundamentales: la interacción biológica entre al menos dos especies vegetales, la presencia de una especie leñosa y perenne, y el manejo de especies vegetales con fines productivos (Somarriba, 1992). Estas condiciones confieren a los Sistemas Agroforestales de Cacao (SAF) complejidad ecológica, que se traduce en una mayor capacidad para sostener funciones ecosistémicas clave tales como el secuestro y almacenamiento de carbono, la conservación de la fertilidad del suelo, la regulación microclimática y la provisión de hábitats para la fauna asociada (Clough et al., 2009; de Almeida Campos Cordeiro et al., 2018; Ordoñez-Espinosa et al., 2020).

Para aprovechar las bondades ecológicas y productivas de los sistemas agroforestales de cacao, resulta fundamental comprender su estructura y diversidad florística. Estos aspectos no solo reflejan las condiciones ecológicas y el manejo aplicado por los agricultores (Clough et al., 2009; Asigbaase et al., 2019), sino que también influyen directamente en la provisión de servicios ecosistémicos (Bhagwat et al., 2008; de Almeida Campos Cordeiro et al., 2018; Ordoñez-Espinosa et al., 2020). La caracterización detallada de estas comunidades permite identificar oportunidades para mejorar la funcionalidad ecológica y la sostenibilidad productiva de los SAF (Tscharntke et al., 2011; Somarriba et al., 2024).

En Colombia, diversos estudios han abordado la caracterización de la diversidad y estructura florística asociadas a los SAF con enfoques regionales y metodologías diversas, y en ellos se evidencia una diversidad vegetal que varía significativamente entre regiones, reflejando factores ecológicos, culturales y económicos locales (Preciado et al., 2011; Minorta-Cely & Ordoñez-Espinosa, 2015; Espinosa-Álzate & Ríos-Osorio, 2016; Navia-Estrada et al., 2019;

Molina et al., 2021; Ordoñez-Espinosa & Rangel-Ch, 2021; Ebratt-Matute, 2022; Solarte et al., 2022; Ruiz-Russi et al., 2023). Según estos estudios se han registrado entre 26 a 74 especies arbóreas por región, predominando especies nativas y multipropósito como *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth, *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken y *Persea americana* Mill. El hecho de que estos estudios se hayan restringido a algunas áreas geográficas específicas limita su representatividad frente a la amplia diversidad de ecosistemas presentes en Colombia. A ello se suma la variabilidad en los enfoques metodológicos empleados, que dificulta establecer comparaciones rigurosas entre regiones. Como consecuencia, persiste un vacío de conocimiento en el país, especialmente en regiones cacaoteras como Santander, Sur de Bolívar, Tolima y Meta, las cuales, pese a su relevancia ecológica y productiva, han sido escasamente documentadas en términos de estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales.

Por lo anterior, se hace necesario profundizar en evaluaciones que permitan capturar la variabilidad estructural y florística de estos sistemas a escala nacional. El presente estudio tiene como objetivo analizar la estructura y diversidad florística en sistemas agroforestales de cacao en cinco ecorregiones de Colombia, utilizando el marco biogeográfico propuesto por Olson et al. (2001). Este análisis con unidades muestrales distribuidas por ecorregiones proporciona una base sólida para comprender la estructura y diversidad de la flora arbórea en los SAF de cacao a partir de muestras representativas de los principales núcleos cacaocultores. Se parte de la hipótesis que los sistemas agroforestales de cacao presentan patrones estructurales y florísticos distintivos en cada ecorregión, reflejados en los índices de diversidad alfa y beta, en los valores de importancia de las especies y en la distribución de clases diamétricas y de altura de la vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó con información de una base de datos de flora arbórea asociada a



sistemas agroforestales de cacao generada en el marco del programa Asómbtrate, implementado por Solidaridad Network Colombia como parte del trabajo articulado con la plataforma *Agroforestry Carbon Removal Units for the Organic Restoration of Nature* (Acorn), bajo los lineamientos del estándar Plan Vivo (2025). Esta base de datos fue construida a partir de censos de vegetación que tuvo como propósito establecer líneas base de flora en fincas cacaoteras, como insumo para la estimación de biomasa aérea y la implementación de mecanismos de generación de créditos de carbono en Colombia.

Área de estudio: El estudio se realizó en cinco ecorregiones de Colombia: Bosque Montano del valle del Magdalena (Eco1), Bosque Húmedo Magdalena-Urabá (Eco2), Bosque Seco del Valle del Magdalena (Eco3), Bosque Montano de la Cordillera Oriental (Eco4) y Bosque Seco de Apure-Villavicencio (Eco5). La selección de las zonas de estudio se realizó, a partir del análisis de información secundaria sobre la producción nacional de cacao obtenida de Fedecacao (2025) para identificar los principales núcleos cacaoteros del país. Posteriormente, la selección de las fincas cacaoteras se llevó a cabo mediante un muestreo no probabilístico de tipo dirigido, con base en listados proporcionados por asociaciones locales de productores, considerando criterios de localización en núcleos productivos, accesibilidad en campo y disposición de los productores para participar en el estudio. En total, se evaluaron SAF en 37 municipios de siete departamentos: Antioquia, Bolívar, Cundinamarca, Huila, Meta, Santander y Tolima. La edad promedio de los SAF fue de 14.6 años (± 10.6).

Los sitios de muestreo en las ecorregiones se ubicaron entre los 15 y 1 313 m. s. n. m. y abarcaron un gradiente de condiciones biofísicas y productivas que permite describir la variabilidad estructural y florística de los sistemas agroforestales de cacao a escala nacional (Fig. 1).

Metodología de campo: El trabajo de campo se realizó entre los meses de septiembre

de 2022 y enero 2024. En total se muestrearon 500 parcelas de 1 ha, distribuidas en 100 parcelas por ecorregión, para un área total de 500 ha. En cada plantación se estableció una parcela que constituyó la unidad de muestreo principal. Cada parcela estuvo conformada por 16 subparcelas contiguas de 25 x 25 m, para facilitar el levantamiento de la información dentro del área total. La disposición de las subparcelas se adaptó a la forma irregular de las plantaciones, de manera que el conjunto mantuviera el área total de una hectárea (Plan Vivo, 2025). En las parcelas, el diámetro del tallo a la altura del pecho (DAP) se midió con cinta diamétrica a 1.3 m desde la base del suelo, considerando únicamente individuos con $DAP \geq 10$ cm. Para especies arbustivas, como *Coffea arabica*, se midió su diámetro a 15 cm desde la base del tallo (Vallejos-Torres et al., 2024; Plan Vivo, 2025). En el caso de *Musa paradisiaca*, especie monocotiledónea herbácea sin tallo leñoso verdadero, se registró el diámetro del pseudotallo, estructura formada por la superposición de vainas foliares, como una variable estructural dentro del sistema agroforestal (Jiang et al., 2022). Esta especie se incluyó dada la importancia que posee en los sistemas agroforestales de cacao en Colombia (Ordóñez-Espinosa & Rangel-Ch., 2021; Solarte et al., 2022; Ebratt-Matute, 2022; Ruiz-Russi et al., 2023). La altura de los individuos se midió con un flexómetro para aquellos menores a 3 m y con una vara graduada para los mayores (Plan Vivo, 2025).

La identificación de las especies se realizó siguiendo un enfoque no destructivo, de acuerdo con metodologías previamente empleadas en sistemas agroforestales (González-M. et al., 2015; Reyes-Reyes et al., 2022; Verdugo-Morales et al., 2025). En una primera etapa, se registraron en campo los nombres comunes proporcionados por los agricultores locales, los cuales fueron contrastados por el equipo técnico con literatura especializada y aplicaciones botánicas (Pizano & García, 2014; Bernal et al., 2017; Hernández et al., 2018). Para aquellos individuos cuya identificación no fue posible mediante el procedimiento anterior, se realizó un registro fotográfico de características

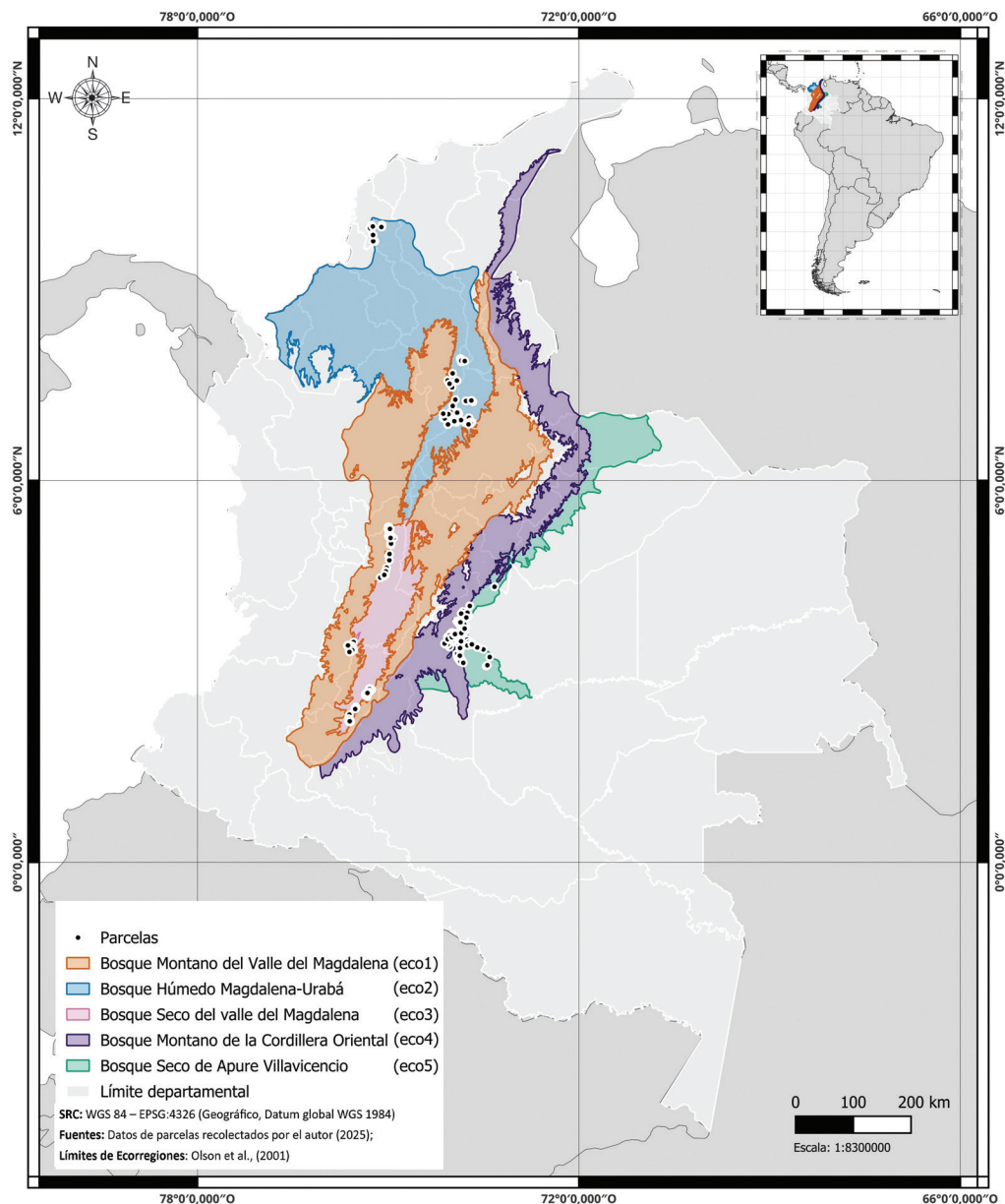


Fig. 1. Localización de parcelas de muestreo en sistemas agroforestales de cacao sobre cinco ecorregiones de Colombia, según la clasificación biogeográfica de Olson et al. (2001). Las parcelas (puntos negros) se ubican en núcleos cacaocultores de cada ecorregión. / **Fig. 1.** Location of sampling plots in cocoa agroforestry systems across five ecoregions of Colombia, according to the biogeographical classification of Olson et al. (2001). The plots (black dots) are located in cocoa-growing areas of each ecoregion.

vegetativas y reproductivas, el cual fue posteriormente contrastado con herbarios digitales de referencia (Missouri Botanical Garden, 2024;

Royal Botanic Gardens Kew, 2024; Universidad Nacional de Colombia: Herbario nacional colombiano, 2024).



Durante el proceso de estandarización taxonómica de la base de datos, los nombres científicos fueron ajustados según las referencias del International Plant Names Index [IPNI], (2022). Finalmente, se determinó el estatus de origen de cada especie en Colombia utilizando el catálogo publicado por Raz y Agudelo-Zamora (2023), clasificándolas según las categorías propuestas por Pyšek et al. (2004): nativa, exótica cultivada y exótica naturalizada.

Estructura vertical y horizontal: La estructura vertical se analizó agrupando los individuos en estratos vegetales propuestos por Rangel-Ch & Velásquez (1997), y para describir la estructura horizontal, se agruparon los valores de DAP en siete clases según la regla de Sturges (1926). Estos datos se organizaron en Microsoft Excel 365 (Microsoft Corporation, 2023) y posteriormente se procesaron y graficaron en RStudio (R Core Team, 2023), utilizando el paquete ggplot2 (Wickham, 2016).

Índice de valor de importancia: Dado el interés por identificar especies dominantes y su relevancia ecológica en cada ecorregión, se calcularon los Índices de Valor de Importancia (IVI) para especies y su análogo para familias (IVF), ambos con base en Rangel-Ch & Velásquez (1997). El IVI consideró la suma de la dominancia relativa, frecuencia relativa y área basal relativa por especie, mientras que el IVF integró también la diversidad relativa de cada familia, entendida como el porcentaje de especies de la familia respecto al total registrado.

Diversidad alfa y beta: La diversidad alfa se evaluó mediante los números de Hill en tres órdenes de diversidad: $q = 0$ (riqueza de especies), $q = 1$ (diversidad de Shannon) y $q = 2$ (dominancia de Simpson) (Jost, 2007), utilizando el paquete Vegan en RStudio, dado que el análisis se realizó a partir de censos completos de individuos arbóreos que cumplieran con criterios estructurales de inclusión en parcelas de igual tamaño (Roswell et al., 2021; Oksanen et al., 2025). Para evaluar diferencias entre ecorregiones en los valores de diversidad alfa,

se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, seguida de comparaciones múltiples de Dunn con corrección de Holm, utilizando el paquete rstatix (Kassambara, 2023). La diversidad beta se analizó con el índice de similitud de Bray-Curtis, complementado con un análisis de agrupamiento jerárquico (UPGMA) en PAST v.5.2.1 (Hammer et al., 2001). Adicionalmente se aplicó una prueba de Mantel para evaluar la correlación entre la matriz de similitud florística (Bray-Curtis) y la matriz de distancias geográficas calculadas a partir de los centroides de las parcelas muestreadas en cada ecorregión, empleando nuevamente el paquete Vegan (Bakker, 2024; Oksanen et al., 2025).

Riqueza de especies observadas y estimadas: Se generaron curvas de acumulación de especies mediante rarefacción y extrapolación empleando el paquete iNEXT (Hsieh et al., 2016; Díaz-Rueda et al., 2024), con el fin de evaluar la suficiencia del muestreo, estimar la riqueza esperada y calcular la completitud del inventario por ecorregión. Se consideró representativo un nivel de completitud ≥ 80 % (Jiménez-Valverde & Hortal, 2003; Villareal et al., 2004).

RESULTADOS

Riqueza de especies: Se registraron 38 221 individuos, distribuidos en 51 familias, 153 géneros y 205 especies (Tabla 1, Tabla 2), de las cuales el 75 % fueron nativas (156), 22 % exóticas cultivadas (44) y 3 % exótica naturalizada (5) (MST 1).

En cuanto a valores de riqueza y densidad, la ecorregión Bosque Montano del Valle del Magdalena registró una riqueza promedio de 7 especies/parcela (± 4.1) y una densidad de 51 individuos/parcela (± 41.7). En el Bosque Húmedo Magdalena-Urabá, se observó la mayor densidad, con 121 individuos/parcela (± 62.3) y una riqueza media de 11 especies/parcela (± 4.7). El Bosque Seco del Valle del Magdalena presentó la menor riqueza, con 8 especies/parcela (± 5.3) y una densidad de 70 individuos/parcela (± 58.1). En el Bosque

Tabla 1

Especies con mayor índice de valor de importancia en las cinco ecorregiones. / **Table 1.** Species with the highest importance value index in the five ecoregions.

Especie	Ind.	A.B.	Fr.	Dr.	Dor.	IVI
Bosque Montano del valle del Magdalena (Eco1)						
<i>Persea americana</i> Mill.	1 476	530.68	11.6	28.83	38.6	79.1
<i>Musa paradisiaca</i> L.	927	29.12	3.15	18.11	2.12	23.38
<i>Pseudosamanea guachapele</i> (Kunth) Harms	186	195.21	5.3	3.63	14.21	23.15
<i>Erythrina poeppigiana</i> (Walp.) O.F.Cook	247	132.5	4.87	4.82	0.01	19.35
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	234	107.92	5.15	4.57	7.85	17.58
Sub Total	3 070	995.51	30.08	59.98	72.49	162.56
Especies restantes (63)	2 048	377.63	69.9	40.01	27.5	137.4
Total (68)	5 118	1 373.1	100	100	100	300
Bosque Húmedo Magdalena-Urabá (Eco2)						
<i>Musa paradisiaca</i> L.	4 329	127.79	6.81	64.9	14.2	85.9
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	1 030	108	5.58	0.06	12	17.6
<i>Persea americana</i> Mill.	460	49.8	3.6	6.9	5.5	16.12
<i>Spondias mombin</i> Jacq.	330	53.6	4.9	4.9	5.9	15.89
<i>Albizia niopoides</i> (Spruce ex Benth.) Burkart	237	84	3.31	0.01	9.36	13
Sub Total	6 386	423.4	24.36	76.88	47.14	148.39
Especies restantes (96)	5 722	474.7	75.63	23.11	52.85	151.6
Total (101)	12 108	898.2	100	100	100	300
Bosque Seco del valle del Magdalena (Eco3)						
<i>Persea americana</i> Mill.	1 439	70.11	8.29	55.1	10.95	74.3
<i>Anacardium excelsum</i> (Bertero & Balb.) Skeels	176	107.98	3.72	0.02	16.87	20.62
<i>Pseudosamanea guachapele</i> (Kunth) Harms	230	40.2	3.96	8.81	6.2	19
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	457	86.7	5	0.07	13.5	18.6
<i>Psidium guajava</i> L.	303	5.5	4.5	11.6	0.86	17
Sub Total	2 605	310.6	25.6	75.6	48.5	149.8
Especies restantes (93)	4 424	329.5	74.3	24.3	51.4	150.1
Total (98)	7 029	640.1	100	100	100	300
Bosque Montano de la Cordillera Oriental (Eco4)						
<i>Musa paradisiaca</i> L.	1 584	45.38	4.51	20.49	12.37	37.38
<i>Persea americana</i> Mill.	838	16.74	5.37	10.84	4.56	20.78
<i>Citrus sinensis</i> [L.] Osbeck	571	14.77	4.19	7.39	4.03	15.61
<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	525	16.66	3.54	6.79	4.54	14.88
<i>Citrus reticulata</i> Blanco	496	11.55	3.97	6.42	3.15	13.54
Sub Total	4 014	105.10	21.59	51.93	28.66	102.18
Especies restantes (101)	3 715	261.6	78.4	48	71.3	197.8
Total (106)	7 729	366.7	100	100	100	300
Bosque Seco de Apure-Villavicencio (Eco5)						
<i>Musa paradisiaca</i> L.	1 525	43.21	4.33	24.45	13.16	41.94
<i>Persea americana</i> Mill.	533	19.19	5.27	8.55	5.85	19.66
<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	456	18.35	3.86	7.31	5.59	16.76
<i>Cedrela odorata</i> L.	209	21.99	4.05	3.35	6.70	14.10

Especie	Ind.	A.B.	Fr.	Dr.	Dor.	IVI
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	220	14.11	3.39	3.53	4.30	11.21
Sub Total	2 943	116.84	20.90	47.19	35.59	103.68
Especies restantes (99)	3 294	211.4	79	52.8	64.4	196.3
Total (105)	6 237	328.3	100	100	100	300

Ind. Número de individuos; A.B. Área basal en m²; Fr. Frecuencia relativa; Dr. Densidad relativa; Dor. Dominancia relativa
IVI: Índice de Valor de Importancia.

Tabla 2
Familias con mayor índice de valor de importancia (IVF) en cinco ecorregiones. / **Table 2.** Families with the highest Importance Value Index (IVF) in five ecoregions.

Familia	Eco1			Eco2			Eco3			Eco4			Eco5		
	Esp.	Ind.	IVF	Esp.	Ind.	IVF	Esp.	Ind.	IVF	Esp.	Ind.	IVF	Esp.	Ind.	IVF
Fabaceae	14	723	58.2	21	1 385	42.5	18	1 212	58.0	21	1 451	64.5	19	1 478	77.3
Musaceae	1	927	38.3	1	4 329	85.7	1	205	6.4	1	1 584	53.4	1	1 525	62.1
Lauraceae	2	1 635	106	2	463	13.2	8	1 545	55.9	4	870	27.9	5	590	26.7
Cordiaceae	1	234	17.0	1	1 030	29.1	2	460	26.6	1	186	7.5	1	220	11.4
Rutaceae	5	170	9.01	6	223	4.4	7	695	22.1	4	1 217	39.4	5	288	11.2
Anacardiaceae	4	115	6.6	5	511	17.4	5	364	31.4	4	90	5.7	5	136	11.1
Meliaceae	2	169	10.2	3	476	11.3	4	324	14.6	2	222	11.0	3	322	19.1
Rubiaceae	2	531	21.2	4	33	0.7	2	121	3.5	4	21	0.7	1	2	0.08
Annonaceae	2	233	11.9	3	305	5.8	2	586	18.6	2	91	3.0	3	88	3.6
Malvaceae	3	15	1.4	7	383	10.9	5	187	11.5	7	224	11.1	7	140	9.5
Urticaceae	1	30	1.5	1	822	19.8	1	80	3.6	2	115	4.3	2	50	3.9
Lecythidaceae	1	14	0.55	3	364	8.7	1	10	0.7	2	508	16.4	3	295	10.6
Myrtaceae	4	108	5.51	3	214	4.2	3	308	9.7	4	192	12.6	4	170	6.2
Acanthaceae	1	5	0.52	--	--	--	--	--	--	1	16	0.5	1	12	0.5
Moraceae	5	33	3.78	5	281	10.1	4	61	4.4	5	49	5.2	3	63	5.8
Arecaceae	1	1	0.23	6	332	10.9	4	66	3.6	4	71	2.5	6	157	7.8

Ind.: N. de individuos; Esp.: N. de especies. Eco1: Bosque Montano valle del Magdalena; Eco2: Bosque Húmedo Magdalena-Urabá; Eco3: Bosque Seco valle del Magdalena; Eco4: Bosque Montano Cordillera Oriental; Eco5: Bosque Seco Apure-Villavicencio.

Montano de la Cordillera Oriental, se registraron 9 especies/parcela ($\pm$ 6.1) y una densidad de 78 individuos/parcela ($\pm$ 72.9). Finalmente, el Bosque Seco de Apure–Villavicencio mostró una riqueza promedio de 10 especies/parcela ($\pm$ 5.6) y una densidad de 62 individuos/parcela ($\pm$ 32.8).

De las 205 especies registradas, 27 se compartieron entre todas las ecorregiones. Fabaceae tuvo el mayor número de especies (37), seguida de Malvaceae, Moraceae, Arecaceae y Rutaceae, con 11 especies cada una.

Estructura vertical y horizontal: El 83 % de los individuos se registraron entre los estratos de 1.5-12 m de altura, correspondientes a los niveles arbustivo y subarbóreo. Los individuos mayores a 25 m representaron el 0.8 % del total (Fig. 2). En cuanto al DAP, el 82.6 % de los individuos se concentraron por debajo de los 40 cm, mostrando una disminución progresiva en la densidad conforme aumentó el diámetro y con pocos registros por encima de 100 cm (1.4 %). Por debajo de los 40 cm, se destacaron *M. paradisiaca* (26.8 %), *P. americana* (10.3 %),

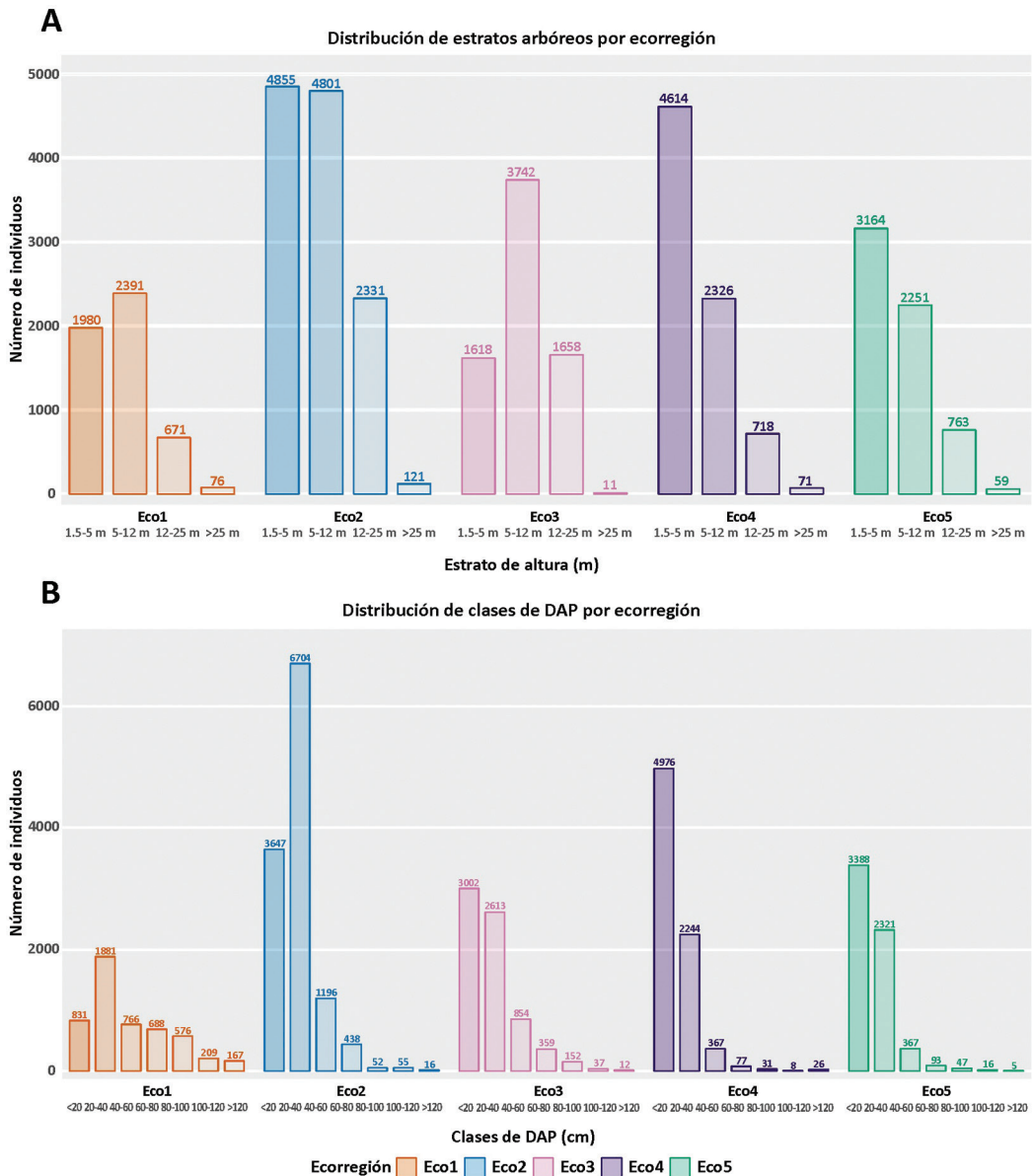


Fig. 2. Distribución estructural de la vegetación arbórea en parcelas agroforestales de cacao en cinco ecorregiones de Colombia. **A.** Distribución de individuos por estratos (1.5-5 m, 5-12 m, 12-25 m y > 25 m). **B.** Distribución de individuos por clases diamétricas (DAP) (< 20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120 y > 120 cm). Las barras representan el número total de individuos registrados en 500 parcelas (100 por ecorregión). Los datos provienen de mediciones de campo realizadas entre 2022 y 2024, siguiendo el protocolo Plan Vivo (2025) y los estratos propuestos por Rangel-Ch & Velásquez (1997). Las clases diamétricas fueron definidas conforme a la regla de Sturges (1926) para describir la estructura horizontal. Eco1: Bosque Montano valle del Magdalena; Eco2: Bosque Húmedo Magdalena-Urabá; Eco3: Bosque Seco valle del Magdalena; Eco4: Bosque Montano Cordillera Oriental; Eco5: Bosque Seco Apure-Villavicencio. / **Fig. 2.** Structural distribution of tree vegetation in cacao agroforestry plots in five ecoregions of Colombia. **A.** Distribution of individuals by strata (1.5-5 m, 5-12 m, 12-25 m, and > 25 m). **B.** Distribution of individuals by diameter at breast height (DBH) classes (< 20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120, and > 120 cm). The bars represent the total number of individuals recorded in 500 plots (100 per ecoregion). Data are from field measurements taken between 2022 and 2024, following the Plan Vivo protocol (2025) and the strata



proposed by Rangel-Ch & Velásquez (1997). Diameter classes were defined according to Sturges' rule (1926) to describe horizontal structure. Eco1: Magdalena Valley Montane Forest; Eco2: Magdalena-Urabá Humid Forest; Eco3: Magdalena Valley Dry Forest; Eco4: Eastern Cordillera Montane Forest; Eco5: Apure-Villavicencio Dry Forest.

G. sepium (4.3 %), *C. alliodora* (4.0 %) y *Cari-niana pyriformis* (3.6 %).

Índices de IVI y IVF: El análisis del índice de IVI mostró que la estructura específica de los sistemas agroforestales de cacao presentó variación entre ecorregiones (Tabla 1). En general, *P. americana* y *M. paradisiaca* se mantuvieron entre las especies con mayor IVI en varias ecorregiones, aunque su posición relativa varió a lo largo del gradiente regional. Otras especies arbóreas como *C. alliodora*, *Pseudosamanea guachapele*, *Cedrela odorata*, *G. sepium*, *Erythrina poeppigiana* y *Anadenanthera peregrina* también registraron valores elevados de IVI en las ecorregiones, mientras que el resto de las especies presentó valores de IVI menores (Tabla 1).

A nivel general, las especies con mayor IVI fueron *P. americana* (21.5), *M. paradisiaca* (18.4), *C. alliodora* (11.5), *P. guachapele* (7.9), *C. odorata* (7.1), *Cecropia peltata* (5.4), *G. sepium* (5.38) y *E. poeppigiana* (5.33) (MST 1).

El IVF mostró que la estructura familiar de los sistemas agroforestales de cacao estuvo dominada por un número reducido de familias, con variaciones entre ecorregiones (Tabla 2). En conjunto, Fabaceae, Musaceae y Lauraceae concentraron los mayores valores de IVF y se mantuvieron como las familias estructuralmente más relevantes en los sistemas evaluados, aunque su jerarquía relativa cambió entre ecorregiones.

Un segundo grupo de familias, integrado principalmente por Cordiaceae, Rutaceae, Anacardiaceae y Meliaceae, presentó valores intermedios de IVF, contribuyendo de manera variable a la estructura de los sistemas agroforestales. En contraste, varias familias registraron de forma consistente valores bajos de IVF en la mayoría de las ecorregiones, entre ellas Acanthaceae, Rubiaceae, Moraceae y Areaceae, lo que indica una participación

estructural reducida dentro del conjunto de familias evaluadas.

Diversidad alfa: La diversidad alfa, expresada mediante los números de Hill, en el primer orden, riqueza de especies ($q = 0$), se detectó una diferencia altamente significativa entre las ecorregiones ($H = 34.44$, $gl = 4$, $p < 0.001$). El Bosque Húmedo Magdalena-Urabá presentó la mayor riqueza promedio (10.80 ± 4.75 especies efectivas) (Fig. 3), siendo significativamente superior al Bosque Montano valle del Magdalena ($p < 0.001$), al Bosque Seco valle del Magdalena ($p < 0.001$) y al Bosque Montano Cordillera Oriental ($p = 0.009$). Para $q = 1$ (diversidad de Shannon), el mayor valor promedio correspondió al Bosque Seco de Apure-Villavicencio (5.74 ± 3.77), seguido por el Bosque Húmedo Magdalena-Urabá (5.39 ± 2.82) (Fig. 3). No obstante, aunque la prueba de Kruskal-Wallis evidenció diferencias globales entre ecorregiones ($H = 15.46$, $gl = 4$, $p = 0.004$), las comparaciones múltiples no revelaron contrastes significativos entre pares de ecorregiones, lo que indica que los valores de $q = 1$ fueron similares entre las zonas.

Finalmente, para $q = 2$, el análisis global sugirió una variación significativa en la dominancia entre las ecorregiones ($H = 10.59$, $gl = 4$, $p = 0.032$). Las ecorregiones Bosque Seco Apure-Villavicencio (4.27 ± 2.85) y Bosque Húmedo Magdalena-Urabá (3.89 ± 2.13) tendieron a presentar una menor dominancia en comparación con la de Bosque Montano valle del Magdalena (3.22 ± 1.86). Sin embargo, las pruebas de comparación múltiple no lograron detectar diferencias significativas específicas entre pares de ecorregiones ($p > 0.05$).

Diversidad beta: Los valores de Bray-Curtis entre las cinco ecorregiones, revelaron diferencias en la composición florística en los SAF

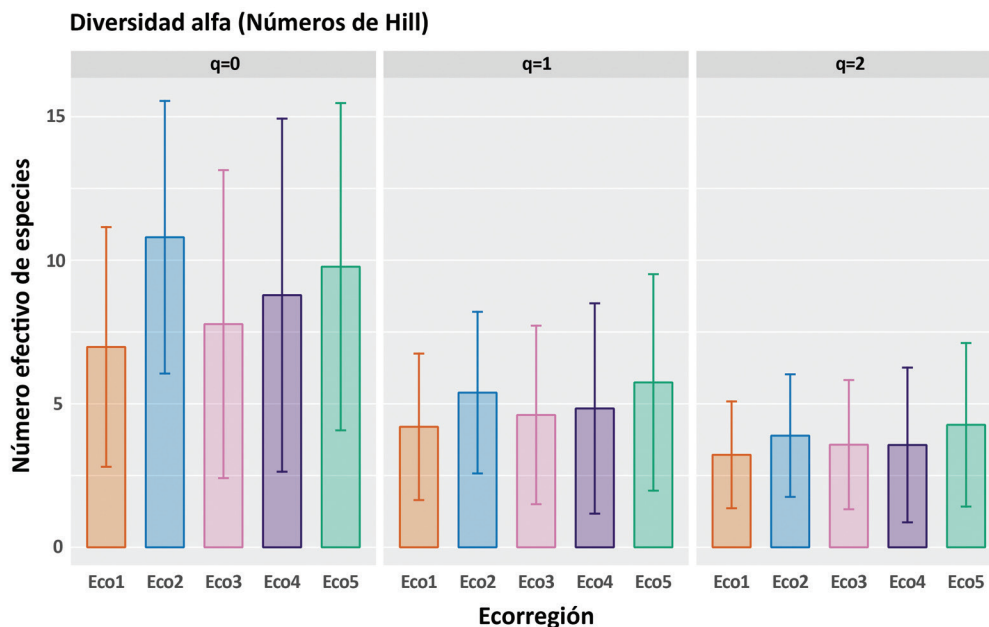


Fig. 3. Diversidad alfa a través de números de Hill en parcelas agroforestales de cacao en cinco ecorregiones de Colombia. Los valores corresponden al número efectivo de especies para tres órdenes de diversidad: $q = 0$ (riqueza de especies), $q = 1$ (diversidad de Shannon) y $q = 2$ (dominancia de Simpson). Las barras representan los promedios $\pm$ desviación estándar, calculados con el paquete Vegan en RStudio. Eco1: Bosque Montano valle del Magdalena; Eco2: Bosque Húmedo Magdalena-Urabá; Eco3: Bosque Seco valle del Magdalena; Eco4: Bosque Montano Cordillera Oriental; Eco5: Bosque Seco Apure-Villavicencio. / **Fig. 3.** Alpha diversity using Hill numbers in cacao agroforestry plots across five ecoregions of Colombia. Values correspond to the effective number of species for three diversity orders: $q = 0$ (species richness), $q = 1$ (Shannon diversity), and $q = 2$ (Simpson dominance). Bars represent means $\pm$ standard deviations, calculated using the Vegan package in RStudio. Eco1: Magdalena Valley Montane Forest; Eco2: Magdalena-Urabá Humid Forest; Eco3: Magdalena Valley Dry Forest; Eco4: Eastern Cordillera Montane Forest; Eco5: Apure-Villavicencio Dry Forest.

(Fig. 4). La mayor similitud se registró entre las ecorregiones Bosque Montano de la Cordillera Oriental y Bosque Seco de Apure-Villavicencio (0.74), seguidas por Bosque Seco del valle del Magdalena y Bosque Montano del valle del Magdalena (0.5). La prueba de Mantel mostró una correlación positiva moderada entre la matriz de similitud florística (Bray–Curtis) y la matriz de distancias geográficas ($r = 0.49$, $p = 0.033$, $n = 5$), lo que indica que la disimilitud florística tiende a aumentar conforme se incrementa la distancia geográfica entre parcelas.

Riqueza de especies observadas y estimadas: Las curvas de acumulación de especies indicaron un esfuerzo de muestreo adecuado en las cinco ecorregiones, con niveles de

completitud superiores al 90 %. La mayor proporción de especies observadas se registró en los SAF del Bosque Húmedo del Magdalena-Urabá (95.7 %), seguido del Bosque Seco de Apure-Villavicencio (95.2 %), el Bosque Montano de la Cordillera Oriental (93.8 %), el Bosque Seco del Valle del Magdalena (90.8 %) y el Bosque Montano del Valle del Magdalena (87.04 %) (Fig. 5).

DISCUSIÓN

Los SAF de cacao analizados en cinco ecorregiones de Colombia registraron valores de riqueza que superaron lo reportado en estudios previos para el país, que documentaron entre 26 y 74 especies (Preciado et al., 2011;

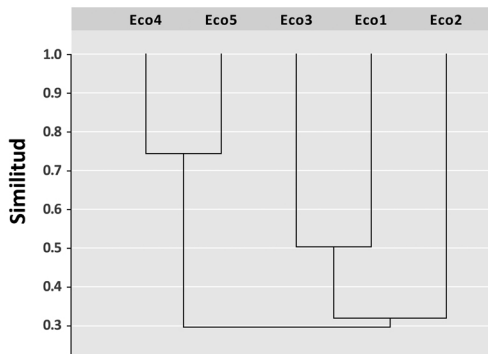


Fig. 4. Dendrograma de similitud florística en parcelas agroforestales de cacao distribuidas entre cinco ecorregiones de Colombia, utilizando el índice de Similitud de Bray-Curtis y el método de agrupamiento jerárquico (UPGMA) en el paquete estadístico PAST. Eco1: Bosque Montano valle del Magdalena; Eco2: Bosque Húmedo Magdalena-Urabá; Eco3: Bosque Seco valle del Magdalena; Eco4: Bosque Montano Cordillera Oriental; Eco5: Bosque Seco Apure-Villavicencio. / **Fig. 4.** Dendrogram of floristic similarity in agroforestry plots of cacao distributed among five ecoregions of Colombia, using the Bray-Curtis Similarity Index and the hierarchical clustering method (UPGMA) in the PAST statistical package. Eco1: Montane Forest of the Magdalena Valley; Eco2: Humid Forest of Magdalena-Urabá; Eco3: Dry Forest of the Magdalena Valley; Eco4: Montane Forest of the Eastern Cordillera; Eco5: Dry Forest of Apure-Villavicencio.

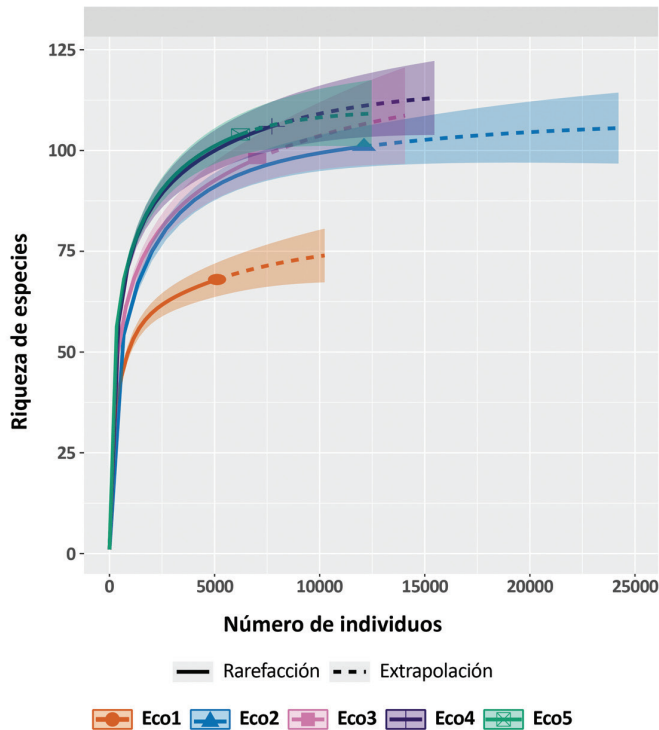


Fig. 5. Curvas de rarefacción y extrapolación de la riqueza de especies en parcelas agroforestales de cacao en cinco ecorregiones de Colombia. Las curvas muestran la relación entre el número acumulado de individuos y la riqueza de especies observada (líneas continuas) y estimada por extrapolación (líneas discontinuas). Las bandas sombreadas indican el intervalo de confianza al 95 %. Los análisis se realizaron con el paquete iNEXT en RStudio, utilizando 100 parcelas por ecorregión. Eco1: Bosque Montano valle del Magdalena; Eco2: Bosque Húmedo Magdalena-Urabá; Eco3: Bosque Seco valle del Magdalena; Eco4: Bosque Montano Cordillera Oriental; Eco5: Bosque Seco Apure-Villavicencio. / **Fig. 5.** Rarefaction and extrapolation curves of species richness in cacao agroforestry plots in five ecoregions of Colombia. The curves show the relationship between the cumulative number of individuals and the observed (solid lines) and extrapolated (dashed lines) species richness. The shaded bands indicate the 95 % confidence interval. The analyses were performed using the iNEXT package in RStudio, with 100 plots per ecoregion. Eco1: Magdalena Valley Montane Forest; Eco2: Magdalena-Urabá Humid Forest; Eco3: Magdalena Valley Dry Forest; Eco4: Eastern Cordillera Montane Forest; Eco5: Apure-Villavicencio Dry Forest.

Minorta-Cely & Ordoñez-Espinosa, 2015; Jadán-Maza et al., 2016; Navia-Estrada et al., 2019; Ordoñez-Espinosa & Rangel-Ch, 2021; Ebratt-Matute, 2022; Solarte et al., 2022; Ruiz-Russi et al., 2023), y se sitúan dentro del rango superior reportado para el Neotrópico. En regiones productoras de cacao en Mesoamérica y Sudamérica, la riqueza arbórea registrada varía entre las 35 y 70 especies (Guiracocha et al., 2001; Sambuichi, 2002; Salgado-Mora et al., 2007; Roa-Romero et al., 2009; Matey et al., 2013; Ramírez-Meneses et al., 2013; Sánchez-Gutiérrez et al., 2017; Salvador-Morales et al., 2019; Avendaño-Arrazate et al., 2021; Zequeira et al., 2021; Morán-Villa et al., 2022; Chavarría et al., 2022; Villanueva-González et al., 2024). No obstante, estas diferencias podrían atribuirse no solo al mayor número de parcelas evaluadas, sino también a la amplitud geográfica del presente estudio; adicionalmente, los análisis de completitud indicaron una cobertura superior al 90 % en todas las ecorregiones, lo que respalda la suficiencia del esfuerzo de muestreo en esta escala biogeográfica (Jiménez-Valverde & Hortal, 2003; Villarreal et al., 2004).

En cuanto a la riqueza de especies ($q = 0$), se detectaron diferencias significativas entre ecorregiones, destacándose el Bosque Húmedo del Magdalena-Urabá. Este patrón se ve reforzado por la mayor densidad nominal de individuos registrada en esta ecorregión, lo que incrementa la probabilidad de detectar un mayor número de especies, en particular aquellas de baja abundancia (Villarreal et al., 2004; Jost, 2007). Si bien el grado de intensificación productiva no fue evaluado directamente en este estudio, el patrón observado podría estar asociado a las condiciones previamente documentadas para esta zona, donde se ha reportado una menor intensificación productiva y una mayor retención de individuos y especies arbóreas en sistemas agroforestales de cacao (Ebratt-Matute, 2022; Martínez-Reina et al., 2023). Esta interpretación coincide con lo señalado por Asigbaase et al. (2019), quienes evidenciaron que niveles más bajos de intensificación se asocian con un aumento en la riqueza

arbórea al favorecer la permanencia de especies poco dominantes.

En contraste con las diferencias observadas en la riqueza ($q = 0$), no se detectaron diferencias significativas entre ecorregiones en los valores de diversidad ($q = 1$) y dominancia ($q = 2$). Este comportamiento es coherente con las propiedades de los números de Hill descritas por Jost (2007), según las cuales el orden $q = 0$ es más sensible a las especies menos abundantes, mientras que los órdenes $q = 1$ y $q = 2$ ponderan principalmente las especies más abundantes. Lo que sugiere que, las especies adicionales registradas en la ecorregión más rica corresponden a individuos de baja abundancia que no modifican de manera sustancial la estructura interna del sistema, manteniéndose estable la dominancia. Desde una perspectiva comparativa, los valores de biodiversidad alfa registrados en este estudio son comparables a los reportados para sistemas agroforestales de cacao en Ecuador (Jadán-Maza et al., 2016), México (Salvador-Morales et al., 2019; Morán-Villa et al., 2022) y Ghana (Asigbaase et al., 2019), donde se observan niveles de diversidad intermedios. En contraste, las cabrucas brasileñas presentan valores superiores de diversidad, asociados a sistemas con estructuras más complejas y menor grado de intensificación productiva (Sambuichi, 2002).

Los índices de IVI y IVF evidenciaron la recurrencia de especies multipropósito de uso común en las ecorregiones analizadas. *P. americana* y *M. paradisiaca* fueron dominantes en la mayoría de las ecorregiones colombianas, al igual que *G. sepium*, *C. alliodora* y *C. odorata*. Estas especies también encabezan los listados de especies clave en México (Sánchez-Gutiérrez et al., 2017; Zequeira et al., 2021), Guatemala (Villanueva-González et al., 2024), Nicaragua (Matey et al., 2013) y Ecuador (Jadán-Maza et al., 2016). Este patrón sugiere la existencia de un núcleo florístico compartido en los SAF de cacao del Neotrópico, integrado por especies nativas e introducidas cultivadas con alto valor económico. En estos sistemas, los valores elevados de IVI reflejan una práctica de manejo selectivo orientada a la productividad;



sin embargo, esta dominancia coexiste con una amplia composición florística y con la presencia de componentes nativos del dosel, algunos de ellos con valores de importancia relevantes. Esta combinación resalta el potencial de los SAF de cacao para integrar objetivos productivos y de conservación (Somarriba & Beer, 2011; Villanueva-Gonzalez et al., 2024).

La estructura vertical de los SAF colombianos, mostró predominio de individuos en los estratos arbustivo y subarbóreo, principalmente especies como *M. paradisiaca*, *P. americana*, *G. sepium* y *Annona muricata*, lo que coincide con lo reportado para otros SAF en Mesoamérica (Chavarría et al., 2022; Sánchez-Gutiérrez et al., 2017; Avendaño-Arrazate et al., 2021; Villanueva-González et al., 2024), Sudamérica (Jadán-Maza et al., 2016; Sambuichi, 2002) y África Occidental (Asigbaase et al., 2019). En estos sistemas, la altura de los árboles puede atribuirse tanto al hábito natural de crecimiento de las especies acompañantes como a las podas de regulación que algunos productores realizan con fines fitosanitarios, de manejo de sombra, mantenimiento de la productividad y facilitación de la cosecha (Morán-Villa et al., 2022). En cuanto al diámetro, más del 80 % de los individuos presentó diámetros menores a 40 cm, con pocos ejemplares emergentes por encima de 100 cm de DAP, conformando una distribución típica en “J invertida”. Esta tendencia, común en ecosistemas forestales tropicales, no responde únicamente a procesos naturales de regeneración, sino que está influenciada por la selección deliberada de especies según su valor económico o funcional, orientada al suministro de frutos, madera, sombra, cercas vivas y fijación de nitrógeno (Sambuichi, 2002; Matey et al., 2013; Jadán-Maza et al., 2016; Sánchez-Gutiérrez et al., 2017).

Estudios en Tabasco, México, indican que este patrón estructural también se mantiene con el tiempo, dado que los productores suelen reemplazar individuos envejecidos o improductivos, frecuentemente por ejemplares de las mismas especies, para conservar la cobertura y funcionalidad del dosel, lo cual genera una renovación gradual del arbolado sin

alterar sustancialmente su estructura (Sánchez-Gutiérrez et al., 2017; Salvador-Morales et al., 2019). Esta configuración refleja una estructura que podría limitar la disponibilidad de hábitats para aves del sotobosque y mamíferos frugívoros, así como el almacenamiento de carbono (Cassano et al., 2014; Cabral et al., 2020; Mildrexler et al., 2020). No obstante, la presencia de flora nativa, como por ejemplo *Anacardium excelsum*, asociada a estadios sucesionales avanzados y con valores de IVI relevantes en las ecorregiones, evidencia oportunidades de enriquecimiento estructural.

El análisis de Similitud de Bray-Curtis, presentó mayor similitud entre el Bosque Montano de la Cordillera Oriental y el Bosque Seco de Apure-Villavicencio, seguida por la observada entre el Bosque Montano del valle del Magdalena y el Bosque Seco del valle del Magdalena. Esta tendencia podría explicarse por la proximidad geográfica entre las parcelas muestreadas. Un patrón que también se evidencia en estudios de relictos boscosos en la cuenca del Río Magdalena en Colombia (Vargas, 2015; Díaz-Rueda et al., 2024). En este sentido, la prueba de Mantel evidenció una correlación moderada, que respalda parcialmente la asociación entre distancia geográfica y similitud florística entre ecorregiones, sugiriendo la influencia adicional de variables no evaluadas en este estudio, como las condiciones ambientales, historia de uso del suelo y las prácticas de manejo agroforestal, sobre la composición florística de los SAF de cacao.

Los resultados también sugieren que los SAF de cacao pueden desempeñar un papel estratégico en la conectividad forestal del paisaje. En África occidental, Asare et al. (2014) demostraron que estos sistemas pueden fortalecer redes de conservación al reducir la fragmentación y restablecer el flujo de especies entre bosques. De igual manera Jadán-Maza et al. (2016), al comparar la diversidad de flora entre los SAF de cacao y coberturas boscosas, señalaron que los SAF pueden favorecer la conectividad biológica y la conservación de especies arbóreas y arbustivas en la Amazonía ecuatoriana. En el contexto colombiano y

neotropical, los SAF de cacao han demostrado tener un potencial similar, dado que, frente a monocultivos o sistemas simplificados, estos se han comportado como reservorios de flora.

Este papel debería evaluarse en la región, mediante enfoques de ecología del paisaje, genética de especies y modelamiento espacial que permitan cuantificar su conectividad estructural y funcional respecto a los fragmentos naturales. No obstante, la eficacia de los SAF en la conectividad no depende únicamente del número de especies, sino también de su configuración estructural y funcional. Según Somarriba et al. (2024), el diseño de sistemas agroforestales debe considerar variables del dosel como la altura, forma y cobertura de copa, la opacidad y fenología foliar, y la disposición espacial de los árboles, ya que estas determinan la sombra, el microclima y la provisión de hábitats. Incorporar estos criterios en la planificación predial y en los modelos de conectividad permitiría optimizar la productividad y los servicios ecosistémicos, consolidando a los SAF de cacao como el medio para afrontar retos en conectividad biológica, resiliencia climática y protección de coberturas boscosas en los paisajes de la región neotropical.

En síntesis, los resultados respaldan parcialmente la hipótesis planteada en este estudio, indicando que los sistemas agroforestales de cacao presentan patrones estructurales y florísticos con grados de diferenciación entre ecorregiones, posiblemente asociados con variaciones ecológicas, geográficas y de manejo. Estas diferencias, expresadas principalmente en la riqueza de especies y en la composición florística, y reflejadas en los índices de diversidad alfa y beta, los valores de importancia y la distribución diamétrica y altimétrica, evidencian la variación estructural y florística que caracteriza a los SAF de cacao en Colombia. Al incorporar un enfoque biogeográfico, este trabajo ofrece una base nacional de referencia sobre la estructura y diversidad de estos sistemas, útil para orientar estrategias de conservación, conectividad, manejo forestal y planificación productiva diferenciadas por región.

Ver material suplementario
a19v74n1-suppl. 1

Ethical statement: The authors declare that they all agree with this publication and made significant contributions; that there is no conflict of interest of any kind; and that we followed all pertinent ethical and legal procedures and requirements. All financial sources are fully and clearly stated in the acknowledgments section. A signed document has been filed in the journal archives.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las familias cacaocultoras que facilitaron sus parcelas y acompañaron las jornadas de toma de datos en campo. A Solidaridad Network y a su programa Asómbrate, por su apoyo técnico y financiero para el desarrollo del estudio. Al equipo técnico del Programa de Cacao y Carbono, por su compromiso y labor en el desarrollo de esta publicación, que contribuye al fortalecimiento del conocimiento técnico y científico del sector cacaocultor en Colombia. Al programa Acorn de Rabobank y a Paola López Vargas, por generar los escenarios que hicieron posible transformar estas investigaciones en mecanismos de pago por servicios ambientales. Finalmente, al programa UK PACT del Reino Unido, por apoyar la generación de conocimiento y la publicación de este artículo a través del proyecto “Soluciones y mercados climáticamente inteligentes para pequeños productores de cacao en Colombia”. Finalmente, al equipo editorial de la revista y a los revisores anónimos, cuyos comentarios y sugerencias contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad del manuscrito.

REFERENCIAS

- Asare, R., Afari-Sefa, V., Osei-Owusu, Y., & Pabi, O. (2014). Cocoa agroforestry for increasing forest connectivity in a fragmented landscape in Ghana. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1143–1156. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9688-3>



- Asigbaase, M., Sjogersten, S., Lomax, B. H., & Dawoe, E. (2019). Tree diversity and its ecological importance value in organic and conventional cocoa agroforests in Ghana. *PLoS ONE*, 14(1), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210557>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Suárez-Venero, G. M., Mendoza-López, A., Martínez-Bolaños, M., Reyes-Reyes, J., & Espinosa-Zaragoza, S. (2021). Tree composition of cocoa associated species: Lacandon jungle and agroforestry systems, Chiapas, Mexico. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 365–381. <https://doi.org/10.15517/AM.V32I2.41630>
- Bakker, J. D. (2024). Mantel test. *Applied Multivariate Statistics in R*.
- Bernal, R., Galeano, G., Rodríguez, A., Sarmiento, H., & Gutiérrez, M. (2017). *Nombres comunes de las plantas de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/>
- Bhagwat, S. A., Willis, K. J., Birks, H. J. B., & Whittaker, R. J. (2008). Agroforestry: A refuge for tropical biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*, 23(5), 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.01.005>
- Cabral, J., Faria, D., & Morante-Filho, J. (2020). Landscape composition is more important than local vegetation structure for understory birds in cocoa agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 481, 118704. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118704>
- Cassano, C., Barlow, J., & Pardini, R. (2014). Forest loss or management intensification? Identifying causes of mammal decline in cacao agroforests. *Biological Conservation*, 169, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.10.006>
- Chan, K. M. A., Agard, J., Liu, J., Aguiar, A. P. D., Armenteras, D., Boedhihartono, A. K., Cheung, W. W. L., Hashimoto, S., Hernández-Pedraza, G. C., Hickler, T., Jetzkowitz, J., Kok, M., Murray-Hudson, M., O'Farrell, P., Satterfield, T., Saysel, A. K., Seppelt, R., Strassburg, B., Xue, D., ... Mohamed, A. A. A. (2019). Chapter 5: Pathways towards a sustainable future. En *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*. IPBES. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3832099>
- Chavarría, C. A., Villanueva, C. E., & Pérez, K. N. (2022). Análisis de la estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de cacao en Jolom-ijix II, Alta Verapaz, Guatemala. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 2, 1–12.
- Clough, Y., Dwi Putra, D., Pitopang, R., & Tschardtke, T. (2009). Local and landscape factors determine functional bird diversity in Indonesian cacao agroforestry. *Biological Conservation*, 142(5), 1032–1041. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.12.027>
- de Almeida Campos Cordeiro, A., Coelho, S. D., Ramos, N. C., & Meira-Neto, J. A. A. (2018). Agroforestry systems reduce invasive species richness and diversity in the surroundings of protected areas. *Agroforestry Systems*, 92(6), 1495–1505. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0095-4>
- Díaz-Rueda, D. M., Herrera-Pacheco, M. A., Plata-Castro, A. D., Ardila-Hurtado, S. F., & Reu, B. (2024). Composición y diversidad florísticas de tres coberturas en la Serranía de Los Yariquies (Santander, Colombia). *Colombia Forestal*, 28(1), e22659. <https://doi.org/10.14483/2256201x.22659>
- Ebratt-Matute, D. (2022). Composición florística y estructura de las especies de sombrero en los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la subregión de los Montes de María, Bolívar-Colombia. *Intropica*, 17(1), 47–60. <https://doi.org/10.21676/23897864.4495>
- Espinosa-Álzate, J. A., & Ríos-Osorio, L. A. (2016). Caracterización de sistemas agroecológicos para el establecimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.) en comunidades afrodescendientes del Pacífico colombiano (Tumaco–Nariño, Colombia). *Acta Agronómica*, 65(3), 211–217. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.50714>
- Fedecacao. (2025). *Economía nacional e internacional*. Federación Nacional de Cacaoteros. Recuperado el 15 de julio de 2025, de <https://www.fedecacao.com.co/economianacional>
- González-M., R., Avella, A., & Díaz-Triana, J. E. (2015). Plataformas de monitoreo para vegetación: toma y análisis de datos. En M. Aguilar-Garavito, & W. Ramírez (Eds.), *Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres* (pp. 91–108). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Guerrero-Pineda, C., Iacona, G. D., Mair, L., Hawkins, F., Siikamäki, J., Miller, D., & Gerber, L. R. (2022). An investment strategy to address biodiversity loss from agricultural expansion. *Nature Sustainability*, 5(7), 610–618. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00871-2>
- Guiracocha, G., Harvey, C., Somarriba, E., Krauss, U., & Carrillo, E. (2001). Conservación de la biodiversidad en sistemas agroforestales con cacao y banano en Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8(1), 77–86.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9.
- Hernández, J. A., Achury, R., Aguilar, J., Arcila, L., Caycedo Rosales, P., Díaz Pulido, A., Muñoz, M., Rodríguez Buriticá, S., & González M., R. (2018). *Bosque seco tropical: Guía de especies*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

- Hsieh, T. C., Ma, K. H., & Chao, A. (2016). iNEXT: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(12), 1451–1456. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12613>
- International Plant Names Index. (2026). *International Plant Names Index*. <https://www.ipni.org/citeus>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2025). *Actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque—Año 2024: Resumen de resultados de monitoreo* (Versión 1.0). Bogotá, Colombia.
- Jadán-Maza, O. A., Torres, B., Selesi, D., Peña, D., Rosales, C., & Gunter, S. (2016). Diversidad florística y estructura en cacaotales tradicionales y bosque natural (Sumaco, Ecuador). *Colombia Forestal*, 19(2). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a01>
- Jiang, Y., Duan, J., Xu, X., Ding, Y., Li, Y., & Yang, Z. (2022). Measurement of the banana pseudo-stem phenotypic parameters based on ellipse model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(3), 195–202. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20221503.6614>
- Jiménez-Valverde, A., & Hortal, J. (2003). Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar la calidad de los inventarios biológicos. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Physiology*, 53(1), 57–59. [https://doi.org/10.1016/S0300-9629\(76\)80010-2](https://doi.org/10.1016/S0300-9629(76)80010-2)
- Jost, L. (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, 88(10), 2427–2439. <https://doi.org/10.1890/06-1736.1>
- Kassambara, A. (2025). *rstatix: Pipe-friendly framework for basic statistical tests* (Versión 0.7.3) [Software]. CRAN. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.rstatix>
- Lopez-Gallego, C., & Morales-Morales, P. (2022). The Red List for the endemic trees of Colombia: Effective conservation targeted for plants required in biodiversity hotspots. *Plants, People, Planet*, 1, 11.
- Martínez-Reina, A. M., Grandett-Martínez, L. M., Novoa-Yanez, R. S., Martínez-Atencia, J. del C., Contreras-Santos, J. L., & Berrio-Guzman, E. E. (2023). Typification of cocoa-producing farms (*Theobroma cacao* L.) in Montes de María and La Mojana, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 34(3), 54574. <https://doi.org/10.15517/am.2023.54574>
- Matey, A., Zeledón, L., Orozco, L., Chavarria, F., & López, A. (2013). Composición florística y estructura de cacaotales y parches de bosque en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 49, 61–67.
- Microsoft Corporation. (2023). *Microsoft Excel (Version 365)* [Software]. <https://www.office.com/>
- Mildrexler, D. J., Berner, L. T., Law, B. E., Birdsey, R. A., & Moomaw, W. R. (2020). Large trees dominate carbon storage in forests east of the Cascade Crest in the United States Pacific Northwest. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 1–15. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.594274>
- Minorta-Cely, V., & Ordoñez-Espinosa, C. M. (2015). Diversidad florística en arreglos agroforestales asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.), de cuatro municipios del sur colombiano. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 2(1), 80–87. <https://doi.org/10.23850/raaa.v2i1.204>
- Missouri Botanical Garden. (2024). *Missouri Botanical Garden*. <https://www.missouribotanicalgarden.org/>
- Molina, J. R., Calderon, P. F. R., Zabala, M. A. C., Moreno, A. P., Valenzuela, Y. V., & Pachajoa, L. E. (2021). Structure and floristic composition of forests associated to *Theobroma* species in the Colombian Amazon. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 128–150. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.1078>
- Morán-Villa, V., Monterroso-Rivas, A., Gómez-Díaz, J., Márquez-Berber, S., & Valdes-Velarde, E. (2022). Floristic composition and arrangement of agroforestry systems of cocoa in Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(2), 1–19. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3840>
- Navia-Estrada, J. F., Benavides Benavides, O., & Barraza Álvarez, F. V. (2019). Caracterización de sistemas agroforestales tradicionales en el pacífico sur de Colombia, departamento de Nariño. *Revista de la Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 11(2), 90–101.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTW A\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTW A]2.0.CO;2)
- Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Borman, T., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., ... Weedon, J. (2025). *vegan: Community ecology package. R package*. (Versión 2.7-2) [Software]. CRAN. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.vegan>
- Ordoñez-Espinosa, C. M., Suárez-Salazar, J. C., Rangel-Churio, J. O., & Saavedra-Mora, D. (2020). Los sistemas agroforestales y la incidencia sobre el estatus hídrico en árboles de cacao. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(1), 256–267. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n1.2021.1623>



- Ordoñez-Espinosa, C. M., & Rangel-Ch, J. O. (2021). Floristic composition and aspects of the structure of the vegetation in agroforestry systems with cocoa (*Theobroma cacao* L. – Malvaceae) in the department of Huila, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 1033–1046. <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.1183>
- Pizano, C., & García, H. (Eds.). (2014). *El bosque seco tropical en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- R Core Team. (2023). *RStudio: Integrated development environment for R (Version 4.3.2)* [Software]. Posit, PBC. <https://posit.co/products/open-source/rstudio/>
- Royal Botanic Gardens Kew. (2024). *Plants of the World Online*. Recuperado el 9 de julio de 2025, de <https://powo.science.kew.org/>
- Plan Vivo. (2025). *PT006: Tool for ground truth sampling (Version 1.0)*. Developed by Acorn, approved by AENOR. Plan Vivo Foundation. <https://www.plan-vivo.org/pt006>
- Preciado, O., Ocampo, C. I., & Ballesteros Possu, W. (2011). Caracterización del sistema tradicional de producción de cacao (*Theobroma cacao* L.), en seis núcleos productivos del municipio de Tumaco, Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(2), 58–69.
- Pyšek, P., Richardson, D. M., Rejmánek, M., Webster, G. L., Williamson, M., & Kirschner, J. (2004). Alien plants in checklists and floras: towards better communication between taxonomists and ecologists. *TAXON*, 53(1), 131–143. <https://doi.org/10.2307/4135498>
- Ramírez-Meneses, A., García-López, E., Obrador-Olán, J. J., Ruiz-Rosado, O., & Camacho-Chiu, W. (2013). Diversidad florística en plantaciones agroforestales de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 29(3), 215–230.
- Rangel-Ch, J. O., & Velázquez, A. (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En *Colombia diversidad biótica II: Tipos de vegetación en Colombia* (pp. 59–88). Universidad Nacional de Colombia.
- Raz, L., & Agudelo Zamora, H. (2023). *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia (Version 1.3)*. Universidad Nacional de Colombia. Checklist dataset. <https://doi.org/10.15472/7avdhn>
- Reyes-Reyes, J., Rodríguez Morales, J. A., Pimiento de la Torre, D. de J., Fuentes Pérez, M. A., Marroquín Morales, P., Merino García, A., & Aguirre Medina, J. F. (2022). Diversidad y estructura de los árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1191>
- Roa-Romero, H., Salgado-Mora, M. G., & Álvarez-Herrera, J. (2009). Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas-México. *Acta Biológica Colombiana*, 14(3), 97–109.
- Roncancio, D. J., Cutter, S. L., & Nardocci, A. C. (2020). Social vulnerability in Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101872. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101872>
- Roswell, M., Dushoff, J., & Winfree, R. (2021). A conceptual guide to measuring species diversity. *Oikos*, 130(3), 321–338. <https://doi.org/10.1111/oik.07202>
- Ruiz-Russi, D. A., Escobar-Pachajoa, L. D., Montealegre-Bustos, F., Galvis-Neira, D. A., Camacho-Díaz, J. E., Jaimes-Suárez, Y. Y., & Rojas-Molina, J. (2023). Characterization of agroforestry systems with cocoa (*Theobroma cacao* L.) in three municipalities of the department of Boyacá, Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(3). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4801>
- Salgado-Mora, M., Ibarra-Núñez, G., Macías-Sámano, J., & López-Báez, O. (2007). Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México. *Inter-ciencia*, 32(11), 763–768. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33901107.pdf>
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabrales, L. del C., Martínez-Sánchez, J. L., Sánchez-Hernández, R., & Valdés-Velarde, E. (2019). Diversity, structure and carbon of the arboreal vegetation on cocoa agroforestry systems. *Madera y Bosques*, 25(1), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638>
- Sambuichi, R. H. R. (2002). Fitossociologia e diversidade de espécies arbóreas em cabruca (mata atlântica raleada sobre plantação de cacau) na Região Sul da Bahia, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 16(1), 89–101. <https://doi.org/10.1590/s0102-33062002000100011>
- Sánchez-Gutiérrez, F., Pérez-Flores, J., Obrador Olan, J. J., Sol Sánchez, Á., & Ruiz-Rosado, O. (2017). Árboles maderables en el sistema agroforestal de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14, 2711–2723. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i14.440>
- Sinclair, K., Thompson-Colón, T., Matamoros, S. E. D. C., Olaya, E., & Melgar-Quinonez, H. (2022). Food insecurity among the adult population of Colombia between 2016 and 2019: The post peace agreement situation. *Food and Nutrition Bulletin*, 43(3), 251–270. <https://doi.org/10.1177/03795721221100890>
- Solarte, J. G., Ballesteros Possú, W., & Calvache Muñoz, D. A. (2022). Análisis florístico de los sistemas agroforestales tradicionales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Nariño. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 11–29. <https://doi.org/10.22490/21456453.5648>
- Somarrriba, E. (1992). Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems*, 19(3), 233–240. <https://doi.org/10.1007/BF00118781>

- Sommarriba, E., & Beer, J. (2011). Productivity of *Theobroma cacao* agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agroforestry Systems*, 81(2), 109–121. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9364-1>
- Sommarriba, E., Saj, S., Orozco-Aguilar, L., Sommarriba, A., & Rapidel, B. (2024). Shade canopy density variables in cocoa and coffee agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 98(3), 585–601. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00931-2>
- Sturges, H. A. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Tittensor, D. P., Walpole, M., Hill, S. L. L., Boyce, D. G., Britten, G. L., Burgess, N. D., Butchart, S. H. M., Leadley, P. W., Regan, E. C., Alkemade, R., Baumung, R., Bellard, C., Bouwman, L., Bowles-Newark, N. J., Chenery, A. M., Cheung, W. W. L., Christensen, V., Cooper, H. D., Crowther, A. R., ... Ye, Y. (2014). A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science*, 346(6206), 241–244. <https://doi.org/10.1126/science.1257484>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Jührbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., & Wanger, T. C. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes — a review. *The Journal of Applied Ecology*, 48(3), 619–629. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>
- Universidad Nacional de Colombia: Herbario Nacional Colombiano. (2024). *Biovirtual*. Recuperado el 15 de julio de 2025, de <http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/search/plants/>
- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jimenez, N., Pichis-García, R., Ordoñez, L., García-Gonzales, P., Quinteros, A., Lozano, A., Saavedra-Ramírez, J., Tuesta-Hidalgo, J. C., Reategui, K., Macedo-Córdova, W., Baselly-Villanueva, J. R., & Marín, C. (2024). Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1410418>
- Vargas, W. G. (2015). Una breve descripción de la vegetación, con especial énfasis en las pioneras intermedias de los bosques secos de La Jagua, en la cuenca alta del río Magdalena en el Huila. *Colombia Forestal*, 18(1). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2015.1.a03>
- Verdugo-Morales, E. G., Yáñez Díaz, M. I., Alanís-Rodríguez, E., González Rodríguez, H., Garza Ocañas, F., & Rodríguez Larramendi, L. A. (2025). Riqueza de especies, estructura horizontal y diversidad arbórea en un gradiente altitudinal en cafetales de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16(88), 148–173. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i88.1506>
- Villanueva-González, C. E., Pérez-Olmos, K. N., Mollinedo, M. S., & Lojka, B. (2024). Exploring agroforestry and food security in Latin America: a systematic review. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05352-4>
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., & Umaña, A. M. (2004). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C. <https://sib.gob.ar/archivos/IAVH-00288.pdf>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2*. In *Use R!* Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Zequeira, C., Santiago, D., MacGregor, I., & Castillo, O. (2021). Tree diversity and composition in Mexican traditional smallholder cocoa agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 95(8), 1589–1602. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00673-z>